干旱半干旱区城市生态效率时空演变及区域差异分析①

赵领娣[1,2]， 李莎莎[1]， 赵志博[1]， 于 翔[3]， 孙凌霄[3,4]， 赵 鹏[3,4]

（1 中国海洋大学经济学院，山东 青岛 266100；
2 教育部人文社会科学重点研究基地中国海洋大学海洋发展研究院，山东 青岛 266100；
3 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011； 4 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：研究西北干旱半干旱区城市生态效率，对其经济、资源、环境的协调统一以及生态文明建设的推进具有重要的现实意义。以西北干旱半干旱区38个城市为研究对象，运用三阶段DEA方法客观地测度了各城市2005—2016年生态效率，同时运用ESDA方法全面分析了生态效率的区域差异。结果显示：干旱半干旱区城市生态效率普遍较低，并呈现正向全局空间自相关关系；热点区域主要以乌鲁木齐、克拉玛依等为中心，冷点区域主要以平凉、固原等为中心，热点区域数量呈现先增后减再增的N形变动趋势，冷点区域数量则呈现先减后增再减的倒N形变动趋势。

关 键 词： 西北干旱半干旱区；生态效率；三阶段DEA；探索性空间数据分析

文章编号：

近年来，随着“西部大开发”战略以及“一带一路”倡议的成功实施，西北干旱半干旱区经济取得了较大发展。2016年除内蒙古外，其余各地国内生产总值同比增速均达到甚至超过全国平均水平，然而由于粗放式的经济发展模式尚未实现根本改变[1]，加之自然环境和人为因素的影响，经济发展与资源和环境之间的矛盾日益突出[2-3]。在大力推进生态文明建设的新时期，如何实现经济发展、资源节约、环境保护的协调统一已经成为亟待解决的关键问题。生态效率作为衡量经济效益、资源效益和环境效益协调程度的有效工具，作为衡量生态文明建设程度的重要指标，已成为学术界和各方关注的热点。科学测度当前生态效率水平，深刻揭示生态效率区域差异，明确探寻生态效率影响因素，并进一步大力提升生态效率，既是干旱半干旱区生态文明建设的现实需要和客观要求，也是推动我国生态文明建设步伐、促进美丽中国建设的重要前提。

国外学者既有基于宏观层面对生态效率展开的研究，包括对欧盟国家间生态效率进行测度与收敛性分析[4]；也有基于行业微观层面展开的研究，包括木制玩具行业[5]、林业[6]、农业[7]、畜牧业[8]；还有基于更为微观的企业层面展开的研究，包括石油石化集团[9]、服务型企业[10]等。相对而言，国内学者对生态效率的研究更多是从区域角度对生态效率进行测定与评价的定量研究。从研究方法看，包括传统DEA[11]、网络DEA[12]、Malmquist指数分解[13]、随机前沿SFA[14]等方法。从研究区域看，集中于省[15]、市[16]、特定地区[17-18]、特定城市群[19]之间。一些学者进一步通过探索性空间数据分析[15]或空间马尔可夫链[1]方法研究生态效率的区域差异与时空演化趋势。

综上所述，国内外学者对生态效率的研究已相当丰富，为后续研究提供了有益启发。但多数学者对生态效率进行评估时，将非有效的效率水平全部归因于管理无效率，忽视了其他因素的影响，无法得到客观真实地效率水平。同时，现有研究中针对干旱半干旱区生态效率的研究较少，已有文献也大多基于省域数据展开定量研究，城市之间生态效率水

① **收稿日期：**2018-12-05； **修订日期：**2019-03-22
基金项目：国家自然科学基金面上项目（71473233，71974176）；国家社科基金专项课题（18VSJ067）资助
作者简介：赵领娣（1963-），女，中国海洋大学经济学院教授，教育部人文社会科学重点研究基地中国海洋大学海洋发展研究院教授，博士生导师，研究方向为资源环境与可持续发展. E-mail：lingdizhao512@163.com
通讯作者：赵志博（1992-），女，中国海洋大学经济学院博士研究生，研究方向为自然资源与环境经济. E-mail：zhibozhao0728@163.com

平的差异性无法清晰体现。基于此,本文在已有研究的基础上进行了如下拓展:首先,运用三阶段DEA方法测度生态效率,克服外部环境变量、随机因素对生态效率的影响,使研究结果更加准确可靠;其次,以干旱半干旱区的38个城市为研究对象,从更为微观的城市数据出发,探究特定区域内各城市生态效率水平的区域差异和空间演变,使对区域生态效率的认知更加全面与客观,为西北干旱半干旱区生态效率的提高、生态文明建设的提升提供有价值的参考与指导。

1 研究方法

1.1 三阶段DEA模型

传统DEA方法忽视了外部环境及随机因素对决策单元效率的影响,将非有效的效率水平全部归因于管理无效率,无法将环境因素及运气等随机因素对效率水平的影响作用分解[20];SFA方法需要事先确定具体的生产函数形式,效率评价受主观因素影响较大[21]。三阶段DEA模型在多投入、多产出存在的前提下充分考虑到环境因素、随机因素对效率值的影响,同时不需要设定函数形式,可以得到更为真实客观的效率值[22]。因此,本文选取三阶段DEA模型对生态效率进行测算。考虑到生态效率测算指标体系中含有环境污染的非期望产出,借鉴SBM、超效率DEA模型,采用超SBM和三阶段组合模型测度生态效率,以解决不良产出存在的问题。

阶段一:超效率SBM模型效率评估。该模型比较成熟,本文不再赘述。

阶段二:SFA分析。第一阶段的效率值包括管理效率、环境变量和随机因素的影响,首先用SFA模型分解这3种效应。公式为:

$$S_{ni}=f^{n}(z_i,\beta^n)+v_{ni}+u_{ni}$$
$$n=1,\cdots,N \quad i=1,\cdots,I \tag{1}$$

式中:S_{ni}表示第i个决策单元第n个投入的松弛变量;$z_i=[z_{1i},\cdots,z_{ki}]$表示$k$个环境变量;$\beta^n$表示外部环境变量参数;$f^{n}(z_i,\beta^n)$表示环境变量对投入松弛变量的影响;$v_{ni}\sim N(0,\sigma_{vn}^2)$表示随机因素对投入松弛的影响;$u_{ni}\sim N^{+}(0,\sigma_{un}^2)$ 表示管理无效率项。

然后调整投入,公式为:

$$x_{ni}^{A}=x_{ni}+[\max_i\{z_i\hat{\beta}^n\}-z_i\hat{\beta}^n]+[\max_i\{\hat{v}_{ni}\}-\hat{v}_{ni}]$$
$$n=1,\cdots,N \qquad i=1,\cdots,I \tag{2}$$

式中:x_{ni}表示原始投入;$max_i\ \{z_i\hat{\beta}^n\}-z_i\hat{\beta}^n$、$max_i\{\hat{v}_{ni}\}-\hat{v}_{ni}$表示将外部环境、随机误差调整至相同情形;$x_{ni}^{A}$表示调整后投入。

阶段三:超效率SBM模型再评估。

1.2 探索性空间数据分析

1.2.1 全局空间自相关分析 全局空间自相关分析是一种研究全局背景下空间相关特征的方法。本文测度指标为全局Moran's I指数:

$$I=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(X_i-\bar{X})(X_j-\bar{X})}{S^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}} \tag{3}$$

式中:X_i是区域i的观测值;W_{ij}是空间权重矩阵;S^2是属性值的方差。指数值为(-1,1),趋近于0,表示空间无关,正值表示正相关,负值表示负相关。

1.2.2 局部空间自相关分析 局部空间自相关分析用来研究区域与其邻域的空间关联格局,*Getis-Ord Gi** 指数用于识别不同空间位置的高值群聚与低值群聚。

$$Gi^*(d)=\frac{\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(d)X_j}{\sum_{j=1}^{n}X_j} \tag{4}$$

标准化:$Z(Gi^*)=\frac{Gi^*-E(Gi^*)}{\sqrt{Var(Gi^*)}}$,$E(Gi^*)$、$Var(Gi^*)$为$Gi^*$的数学期望和方差,$W_{ij}(d)$为空间权重。$Z(Gi^*)$显著为正,意味着高值聚类,是热点区域,反之,低值聚类,是冷点区域。

2 数据说明及来源

2.1 投入产出变量

生态效率的内涵是用尽可能少的生态投入与资源损耗尽可能多地获得经济产出和环境绩效[1]。干旱半干旱区极度缺水,生态、生产和生活用水与生态保护、经济发展息息相关;随着近年来经济发展,人口不断集聚,带来了人力投入,但也造成了城市建设用地的扩张;采掘业、制造业等传统工业发展带来的"三废"排放加剧了环境污染,为本就脆弱的生态系统带来更大压力[23-24]。基于此,并结合前人研究及数据可得性[25],构建指标体系如表1。

表 1 投入产出变量指标体系

Tab. 1 Input-output indicator system

	指标	变量说明
投入	资本投入	固定资产投资(不含农户) / 10^4 元
	土地投入	城市建设用地面积 / km^2
	用水投入	全年供水总量 / 10^4t
	用电投入	全社会用电总量 / 10^4kW · h
	人力投入	年末单位从业人员 / 10^4 人
期望产出	经济产出	地区生产总值 / 10^4 元
非期望产出	环境产出	工业废水排放量 / 10^4t
		工业 SO_2 排放量 / t
		工业烟尘排放量 / t

2.2 外部环境变量

外部环境变量是可控范围之外对生态效率具有重要影响的变量。近年来,干旱半干旱区人口集聚带来了城市紧凑度的上升,科学事业费的支出提升了技术水平、加快了产业结构的转型升级。作为丝绸之路经济带的圈定区域,积极对外加强产业投资、交流合作,外资利用水平上升。同时,随着国家对生态文明建设的推进,政府对“三高”企业的环境规制不断加强,这些都对生态效率产生着重要影响。基于此,并结合前人研究及数据可得性,构建指标体系如表 2。

表 2 外部环境变量指标体系

Tab. 2 External environmental variable indicator system

指标	变量说明
城市紧凑度	人口密度 / 人 · km^2
产业结构	第三产业占 GDP 的比重 / %
外资利用	当年实际使用外资金额 / 10^4USD
科学技术	科学事业费支出 / 10^4 元
环境规制	环境规制综合指数(将工业 SO_2 去除率、工业烟尘去除率、工业固体废弃物综合利用率加权平均得到)

2.3 数据来源

由于海东、吐鲁番、哈密、商洛四市指标数据缺失过多,本文不予考虑,研究对象为新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区、宁夏回族自治区、陕西省、青海省、甘肃省在内的 38 个城市。为确保数据一致性,所有数据均来自 2006—2017 年《中国城市统计年鉴》,个别缺失数据用相邻年份均值补齐。

3 实证结果分析

3.1 第一阶段超 SBM 结果

根据获取数据,运用 Maxdea Ultra 7.0 软件,选择超 SBM 模型对 38 个城市在 2005—2016 年间的生态效率进行分析①。

发现在不消除外部环境变量和随机因素影响的情况下,区域内城市在 2005—2016 年间生态效率平均技术效率约为 0.65,与生产前沿边界相差 35 个百分点,还有足够大的改进空间。另外,城市间生态效率存在明显差异,仅克拉玛依、鄂尔多斯、延安、榆林、武威五市处于技术效率前沿,其他各市生态效率均低于 1。部分城市包括嘉峪关、庆阳、定西、陇南等六市,尽管纯技术效率最有效,但由于规模效率较低,技术效率达不到有效前沿。由于结果包含环境变量和随机因素的干扰,评估值可能存在偏差,无法反映区域之间客观真实的生态效率,需要进一步调整和测算。

3.2 第二阶段 SFA 结果

以第一阶段的投入松弛变量为被解释变量,以城市紧凑度、产业结构、外资利用、科学技术、环境规制为解释变量,研究外部环境变量对投入松弛变量的影响。运用软件 Frontier 4.1,得到 SFA 回归结果(表 3)。

大多数环境变量对投入冗余的回归系数可通过不同显著性水平的检验,γ 值都接近于 1,并通过 1% 水平的检验,表明外部环境及随机因素对生态效率投入冗余存在显著影响,进行第二阶段的投入调整十分必要。进一步研究回归系数,分析回归结果。

(1) 城市紧凑度。该变量对各投入松弛变量的系数均为正,且关于资本、用电、人力、用水投入松弛变量的系数分别通过 5%、1% 水平下的显著性检验。说明城市紧凑度增加带来能源、资源的更多消耗,导致投入浪费增加,减少投入利用效率,为城市生态环境带来更大压力,对生态效率产生不利影响,与彭薇等[26-27]的结论一致。

(2) 产业结构。该变量对资本、土地、用电投入松弛变量的系数为负,且均在 1% 的水平下显著。说明随着干旱半干旱区城市三产占比的提高,资源能源高消耗、生态环境高污染的产业向着技术化、清洁化的高新技术产业、战略性新兴产业演化。产业结构的优化升级促进了经济发展,节约了资源能源,对生态效率产生积极影响,与邢贞成等[28]的结论一致。

① 由于数据繁多,本部分不再对第一、三阶段各城市各年测算结果进行罗列,如有需要可向作者索取。

表 3　第二阶段 SFA 回归结果

Tab. 3　Second stage SFA regression results

变量	资本投入	土地投入	用水投入	用电投入	人力投入
常数项	4.74E+05 ***	-8.60E+00	-6.31E+03 ***	-2.30E+05 ***	-4.23E+01 **
	(4.74E+05)	(-9.36E-01)	(-3.40E+03)	(-2.40E+05)	(-2.06E+00)
城市紧凑度	2.09E+03 ***	1.82E-02	7.40E+00 **	3.42E+02 ***	2.23E-02 ***
	(3.04E+00)	(6.66E-01)	(2.42E+00)	(2.84E+00)	(7.30E+00)
产业结构	-1.17E+04 ***	-1.34E-01 ***	2.91E+01	-3.23E+03 ***	3.06E-02
	(-4.42E+02)	(-2.80E+01)	(6.08E-01)	(-9.20E+02)	(8.21E-01)
外资利用	1.21E+01 **	1.79E-04	2.07E-02	1.26E+00	3.83E-05
	(2.44E+00)	(1.40E+00)	(5.28E-01)	(8.17E-01)	(9.59E-01)
科学技术	-5.63E+00 ***	-3.07E-04	6.20E-03	9.11E-01	5.96E-05
	(-5.83E+00)	(-8.28E-01)	(1.12E-01)	(3.00E-01)	(1.85E-01)
环境规制	-1.23E+06 ***	5.72E+00 ***	1.81E+03 ***	1.13E+05 ***	-6.11E+00 ***
	(-8.10E+05)	(3.56E+00)	(1.53E+03)	(1.15E+05)	(-3.49E+00)
Sigma - squared	1.99E+12 ***	2.38E+03 ***	9.56E+07 ***	4.14E+11 ***	1.18E+02 ***
	(1.99E+12)	(2.38E+03)	(9.56E+07)	(4.14E+11)	(1.20E+02)
gamma	9.84E-01 ***	1.00E+00 ***	1.00E+00 ***	1.00E+00 ***	1.00E+00 ***
	(4.46E+01)	(3.44E+07)	(6.72E+06)	(4.79E+04)	(8.10E+06)

注：*、**、***表示在 10%、5%、1% 的显著性水平下显著，括号中是 t 值

（3）外资利用。外资利用对 5 个投入松弛变量的回归系数均为正，且关于资本投入松弛变量的系数在 5% 的水平下显著。说明目前干旱半干旱区城市外资引入带来的技术转移和外溢效应较弱，多数外资投向了采掘业、制造业等传统工业领域，带来了“污染转移”，对生态效率产生不利影响，与汪克亮等[18-19]的结论一致。

（4）科学技术。科学技术对资本投入松弛变量系数为负，并通过 1% 水平下的显著性检验。说明科学技术的进步，促进了设施设备的更新升级、产业结构的转型优化，拉动了干旱半干旱区城市的经济增长，降低了环境污染、减少了污染治理投入，对生态效率产生积极影响，与罗能生等[29]的结论一致。

（5）环境规制。环境规制对资本、土地投入松弛变量的系数为负，对其余投入松弛变量的系数为正，并通过 1% 水平的显著性检验。通过系数值发现，环境规制对投入松弛的总体效应是负的。说明随着政府环境管制力度的加大，工业企业积极减少 SO_2、烟尘等环境污染物的排放，对生态效率产生了积极影响，与韩增林等[17]的结论一致。

3.3　第三阶段投入调整效率值

调整原始投入后，利用 Maxdea Ultra 7.0 软件将新投入与原始产出重新进行效率测算。

与第一阶段相比，38 个城市的生态效率平均技术效率由 0.65 下降到 0.57，下降了 12.3%，平均纯技术效率由 0.91 上升到 0.95，上升了 4.4%，平均规模效率由 0.72 下降到 0.59，下降了 18.1%。说明在不消除外部环境变量和随机因素影响的情况下，平均技术效率、平均规模效率被高估，平均纯技术效率被低估。去除环境变量和随机因素影响后，生态效率更加不理想。

从效率前沿面角度看，鄂尔多斯和延安保持了效率前沿水平，说明两市生态效率确实较好，生态管理和经济规模相对达到最佳，环境变量并没有对其产生实质影响。克拉玛依、榆林及武威三市的生态效率受到环境变量和随机因素影响，不再处于有效前沿面。呼和浩特市受益于纯技术效率及规模效率的提高，技术效率最终达到有效前沿；从各城市生态效率水平看，技术效率上升的城市包括包头、赤峰、通辽、宝鸡、兰州、西宁等 10 市，说明这些城市受较差的环境条件及随机因素影响，生态效率水平较低。技术效率下降的城市包括克拉玛依、乌海、呼伦贝尔、巴彦淖尔、乌兰察布、铜川等 26 市，说明这些城市受较好的外部环境和随机因素影响，生态效率水平较高。

3.4 生态效率空间格局分析

3.4.1 类型划分 借鉴已有研究[17],将生态效率 *TE* 划分为 4 种类型:效率较低(*TE* <0.6),效率中等(0.1≤*TE* <0.8),效率良好(0.8≤*TE* <1),效率最优(*TE*≥1),运用 ArcGIS 10.3 软件得到生态效率类型分布图(图 1)。

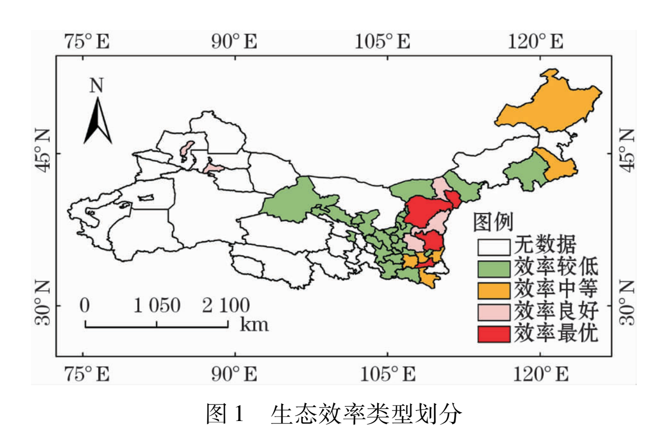


图 1 生态效率类型划分

Fig. 1 Classification of eco-efficiency types

可以发现,西北干旱半干旱区城市生态效率水平相对偏低,在 38 个城市中,生态效率水平达到中等及中等以上的城市占 39%,效率水平较低的城市占 61%,仍有较大的改进提升空间。此外,生态效率空间分布显示出显著的差异性与不平衡性,效率中等及中等以上区域主要分布在新疆维吾尔自治区北部、内蒙古自治区西南部和中部、陕西省北部和中部,包括乌鲁木齐、克拉玛依、鄂尔多斯、呼和浩特、榆林、延安等 15 市,大多为省会城市、第二座亚欧大陆桥经济带城市、呼包银经济带与呼包鄂城市群中心城市、经济区枢纽城市以及国家科研、教育与工业基地,是经济、金融、商贸以及对外开放的中心。凭借着得天独厚的区位优势、资源能源以及较完善的生态文明管理体制,在绿色发展、生态建设等方面取得了很大进展,在节约资源能源、减少环境污染的同时,实现了地方国内生产总值的提高,生态效率达到中等及中等以上甚至实现最优。效率较低区域主要分布在甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区西部和东南部、陕西省中部和西南部,包括武威、平凉、固原、中卫、赤峰、铜川等 23 市,这些城市大多缺乏足够的区位优势,交通等基础设施发展较为缓慢,依赖于粗放式的经济发展方式,对自然资源过度开发现象较为严重,没有实现资源的优化配置。同时,生态管理水平较为滞后,并未有效减少工业企业带来的环境污染,对原本脆弱的生态环境带来了压力,生态环境承载力较低,导致生态效率水平较低。

3.4.2 空间自相关分析

(1)全局空间自相关分析

根据 ArcGIS 10.3,生态效率的全局 Moran's *I* 指数见表 4。

表 4 生态效率全局 Moran's *I* 指数

Tab. 4 Eco-efficiency overall Moran's *I* index

年份	Moran's *I*	*Z* 值	*P* 值
2005	0.138	2.477	0.013 **
2010	0.203	3.472	0.001 ***
2015	0.258	4.469	0.000 ***
2016	0.267	4.506	0.000 ***

生态效率全局 Moran's *I* 指数均为正,*P* 值分别在 5% 和 1% 的水平下显著,说明生态效率空间分布具有正自相关性,生态效率高的城市趋于集聚,生态效率低的城市也趋于集聚。同时,全局 Moran's *I* 指数呈现出逐渐增大的趋势,表明生态效率空间分布上的集聚现象愈发显著。

(2)局部空间自相关分析

为进一步探究各城市生态效率在空间上具体表现为高值集聚(热点)还是低值集聚(冷点),对 *Getis-Ord Gi** 结果采用自然断点法分类,将其从低到高分为冷点、次冷点、次热点和热点四类(图 2)。

可以看出,干旱半干旱区城市生态效率冷热点空间分布总体保持相对集中且大致稳定。2005—2016 年间,热点主要以新疆维吾尔自治区乌鲁木齐、克拉玛依,内蒙古自治区鄂尔多斯、呼和浩特、乌兰察布、包头,陕西省西安、榆林、延安、渭南等城市为中心,冷点主要以甘肃省武威、天水、平凉,宁夏回族自治区吴忠、固原、中卫等城市为中心,冷热点分布的集中区域与效率中等及中等以上类型、效率较低类型的集中区域基本吻合。区位优势突出、基础设施完备、生态管理水平完善的城市生态效率高,同时也推动着邻近城市的生态建设,形成高值集聚区,反之形成低值集聚区。

在总体分布相对稳定的情况下,伴随着时间的推移,各类型区域数量也发生了一些变化。热点区域数量先增加后减少再增加,呈 N 形变动趋势,冷点区域数量先减少后增加再减少,呈倒 N 形变动趋势。具体表现为:(1)2005—2010 年间,随着巴彦淖尔、乌海等城市由冷点向次热点的过渡,乌鲁木齐、渭南、乌兰察布、呼伦贝尔等城市由次冷点向热点的

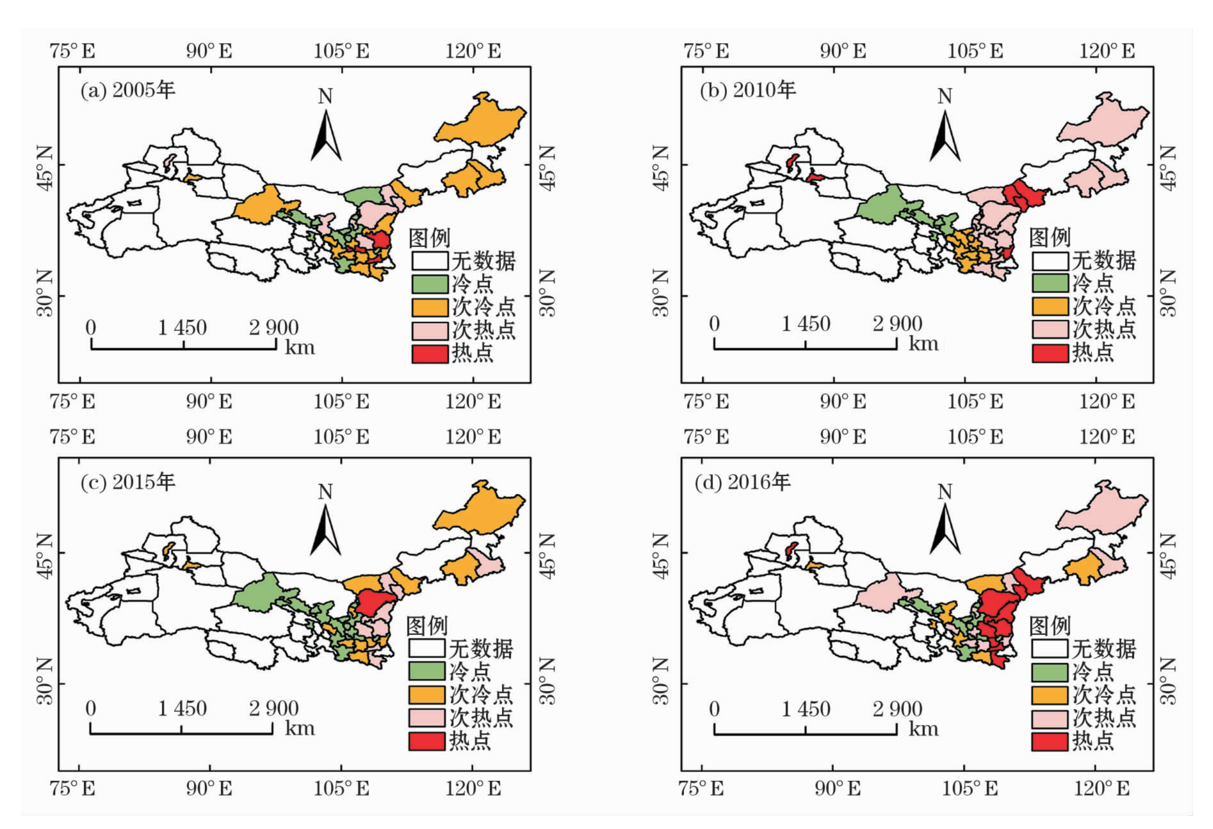


图 2 不同年份生态效率冷点与热点分布

Fig. 2 Cold spot and hot spot distribution of eco-efficiency in different years

过渡,冷点区域数量由 74% 下降至 39%,热点区域数量则由 26% 上升至 61%。该时期处于西部大开发的奠定基础阶段,党和国家积极实施一系列生态保护与修复工程,如天然林保护、封山绿化、退耕还林还草等改善生态环境,取得了明显的生态效益。并通过改善交通、电网、水利等基础设施条件、打造符合各地资源优势和自身特点的特色产业(克拉玛依的石油石化产业、乌鲁木齐的石化冶金产业、巴彦淖尔的农畜产品加工业等)等方式促进经济发展,城市间生态效率实现了提升。(2) 2010—2015 年间,随着乌鲁木齐、克拉玛依等城市由热点向次冷点的过渡,银川、乌兰察布等城市由次热点到次冷点的过渡,热点区域数量由 61% 下降至 24%,冷点区域数量由 39% 增加至 76%。由于"十二五"时期工业化进程的加快,这些城市承接了东部发达地区高污染、高能耗的企业转移,经济增长的同时也加大了生态环境的压力,城市间生态效率水平下降。(3) 2015—2016 年间,随着国家对生态文明建设的不断推进、政府生态管理水平的有力提高,各地依托资源优势,加快传统产业转型升级(呼和浩特以金融、物流、旅游为依托积极发展现代服务业;延安建设"经济绿谷"、"产业新城",发展高端装备制造和新材料产业等)。克拉玛依、呼和浩特、延安等城市恢复至热点空间分布格局,热点区域数量上升至 55%,冷点区域数量下降至 45%。

4 结论与建议

4.1 结论

本文基于 2005—2016 年西北干旱半干旱区 6 省内 38 个城市的统计数据,运用三阶段 DEA 方法测度了各城市生态效率水平,同时运用探索性空间数据分析方法分析了各城市生态效率水平的高低差异及空间关联特征,使生态效率的测度更加准确可靠,效率水平区域差异的分析更加具体细致。研究结论如下:

(1) 剔除外部环境变量和随机因素影响后,各城市生态效率水平变化显著,平均技术效率下降了 12.3%,平均纯技术效率提高了 4.4%,平均规模效率下降了 18.1%。说明外部环境变量和随机因素确实对生态效率产生着重大影响,采用三阶段 DEA 方法对生态效率进行分析是合理必要的。

(2) 在 38 个城市中,效率中等及中等以上类型占 39%,效率较低类型占 61%,前者主要包括乌鲁

木齐、克拉玛依、鄂尔多斯等 15 市,后者主要包括平凉、固原等 23 市。说明西北干旱半干旱区生态效率水平普遍较低,并呈现出显著的城市差异性与不平衡性。

(3) 全局 Moran's *I* 指数均为正,并逐年增大,说明生态效率的空间分布具有愈来愈显著的正自相关性。局部 *Getis-Ord Gi** 结果进一步显示生态效率冷点、热点的集聚区域与效率较低类型、中等及中等以上类型的分布区域基本一致。说明城市生态效率具有外在驱动效应,区位优势突出、生态管理水平完善的城市生态效率高,同时也会推动邻近城市生态效率的提高,反之亦然。

(4) 由于本文研究重点为生态效率的测度与区域差异分析,所以并未对城市间生态效率的外在驱动效应进行量化分析,这将是下一步研究所要解决的关键性问题。

4.2 建议

研究结果从以下两方面为西北干旱半干旱区生态效率的普遍提高提供了新的思路。

(1) 努力缩小各城市生态效率水平的区域差异。首先,应根据低值城市资源优势,因地制宜制定发展规划,提高生态效率。如固原、中卫等地,是重要的农产品基地,可以发展特色农业,旅游观光农业,实现经济效益与生态效益的双赢;金昌、陇南具备镍、铅锌的资源优势,应吸引人才、提高技术水平、促进产业优化升级,提高资源利用率。其次,应发挥乌鲁木齐、克拉玛依、呼和浩特等高值城市的带动作用,加强与邻近低值地区的技术交流、产业合作,不仅促进经济发展,还能提高低值地区的治污能力,实现效率水平的提升。

(2) 全面提高各城市生态效率。应在提高科技研发投入,提升科技水平,增强企业生产技术创新能力和环境污染治理技术创新能力的基础上,加强政府环境管制、严格规制企业的环境污染行为,同时积极优化产业结构、促进第三产业的发展。

参考文献(References)

[1] 侯孟阳,姚顺波. 中国城市生态效率测定及其时空动态演变[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(3):13-21. [HOU Mengyang, YAO Shunbo. Measurement and temporal-spatial dynamic evolution of urban eco-efficiency in China[J]. China Population, Resources and Environment,2018,28(3):13-21.]

[2] 李光明,邓杰. 产业支撑、生态保护与城市可持续发展研究——以乌鲁木齐为例[J]. 干旱区地理,2016,39(4):868-876. [LI Guangming, DENG Jie. Industry supporting, ecology protection and urban sustainable development: A case of the Urumqi[J]. Arid Land Geography,2016,39(4):868-876.]

[3] 郑德凤,郝帅,吕乐婷. 中国大陆生态效率时空演化分析及其趋势预测[J]. 地理研究,2018,37(5):1034-1046. [ZHENG Defeng, HAO Shuai, LV Leting. Spatio-temporal pattern evolution of eco-efficiency and the forecast in mainland of China[J]. Geographical Research,2018,37(5):1034-1046.]

[4] CAMARERO M, CASTILLO J, PICAZO-TADEO A J, et al. Is eco-efficiency in greenhouse gas emissions converging among European Union countries? [J]. Empirical Economics,2014,47(1):143-168.

[5] CHARMONDUSIT K, PHATARACHAISAKUL S, PRASERTPONG P. The quantitative eco-efficiency measurement for small and medium enterprise: A case study of wooden toy industry[J]. Clean Technologies and Environmental Policy,2014,16(5):935-945.

[6] KOSKELA M. Measuring eco-efficiency in the Finnish forest industry using public data[J]. Journal of Cleaner Production,2015,98:316-327.

[7] MAIA R, SILVA C, COSTA E. Eco-efficiency assessment in the agricultural sector: The Monte Novo irrigation perimeter, Portugal[J]. Journal of Cleaner Production,2016,138:217-228.

[8] URDIALES M P, LANSINK A O, WALL A. Eco-efficiency among dairy farmers: The importance of socio-economic characteristics and farmer attitudes[J]. Environmental and Resource Economics,2016,64(4):559-574.

[9] CHARMONDUSIT K, KEARPAKPRAEK K. Eco-efficiency evaluation of the petroleum and petrochemical group in the map Ta Phut Industrial Estate, Thailand[J]. Journal of Cleaner Production,2011,19(2):241-252.

[10] LAHOUEL B B. Eco-efficiency analysis of French firms: A data envelopment analysis approach[J]. Environmental Economics and Policy Studies,2016,18(3):395-416.

[11] 杨亦民,王梓龙. 湖南工业生态效率评价及影响因素实证分析——基于 DEA 方法[J]. 经济地理,2017,37(10):151-156. [YANG Yimin, WANG Zilong. The empirical analysis of Hunan industrial ecological efficiency evaluation and influencing factors-based on DEA method[J]. Economic Geography,2017,37(10):151-156.]

[12] 张煊,王国顺,王一苇. 生态经济效率评价及时空差异研究[J]. 经济地理,2014,34(12):153-160. [ZHANG Xuan, WANG Guoshun, WANG Yiwei. Spatial-temporal differences of provincial eco-efficiency in China based on matrix-type network DEA[J]. Economic Geography,2014,34(12):153-160.]

[13] 李健,邓传霞,张松涛. 基于非参数距离函数法的区域生态效率评价及动态分析[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(4):19-23. [LI Jian, DENG Chuanxia, ZHANG Songtao. The evaluation and dynamic analysis on regional eco-efficiency based on non-parametric distance function[J]. Journal of Arid Land Resources and

Environment,2015,29(4):19－23.]
[14] 李在军,姚云霞,马志飞,等.中国生态效率的空间格局与影响机制分析[J].环境科学学报,2016,36(11):4208－4217.[LI Zaijun,YAO Yunxia,MA Zhifei,et al. Spatial pattern of ecological efficiency in China and its influencing factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2016,36(11):4208－4217.]
[15] 成金华,孙琼,郭明晶,等.中国生态效率的区域差异及动态演化研究[J].中国人口·资源与环境,2014,24(1):47－54.[CHEGN Jinhua,SUN Qiong,GUO Mingjin,et al. Research on regional disparity and dynamic evolution of eco-efficiency in China[J]. China Population,Resources and Environment,2014,24(1):47－54.]
[16] 李佳佳,罗能生.城市规模对生态效率的影响及区域差异分析[J].中国人口·资源与环境,2016,26(2):129－136.[LI Jiajia,LUO Nengsheng. Effect of urban scale on eco-efficiency and the regional difference analysis[J]. China Population,Resources and Environment,2016,26(2):129－136.]
[17] 韩增林,吴爱玲,彭飞,等.基于非期望产出和门槛回归模型的环渤海地区生态效率[J].地理科学进展,2018,37(2):255－265.[HAN Zenglin,WU Ailing,PENG Fei,et al. Eco-efficiency in the Bohai Rim area based on undesirable outputs and threshold regression model[J]. Progress in Geography,2018,37(2):255－265.]
[18] 汪克亮,孟祥瑞,杨宝臣,等.基于环境压力的长江经济带工业生态效率研究[J].资源科学,2015,37(7):1491－1501.[WANG Keliang,MENG Xiangrui,YANG Baochen,et al. The industrial eco-efficiency of the Yangtze River economic zone based on environmental pressure[J]. Resources Science,2015,37(7):1491－1501.]
[19] 付丽娜,陈晓红,冷智花.基于超效率DEA模型的城市群生态效率研究——以长株潭"3＋5"城市群为例[J].中国人口·资源与环境,2013,23(4):169－175.[FU Lina,CHEN Xiaohong,LENG Zhihua. Urban agglomerations eco-efficiency analysis based on super-efficiency DEA model: Case study of Chang-Zhu-Tan"3＋5"urban agglomeration[J]. China Population,Resources and Environment,2013,23(4):169－175.]
[20] CHARNES A,COOPER W W,RHODES E. Measuring the efficiency of decision-making units[J]. European Journal of Operational Research,1978,2(6):429－444.
[21] AIGNER D,LOVELL C A K,SCHMIDT P. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models[J]. Journal of Econometrics,1977,6(1):21－37.
[22] FRIED H O,LOVELL C A K,SCHMIDT S S,et al. Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis[J]. Journal of Productivity Analysis,2002,17(1/2):157－174.
[23] 宋永永,薛东前,代兰海.生态脆弱能源区人居环境与经济协调发展时空格局及演化机制——以晋陕蒙接壤区为例[J].干旱区地理,2017,40(6):1328－1337.[SONG Yongyong,XUE Dongqian,DAI Lanhai. Spatial-temporal pattern and evolution mechanism of coordinated development of human settlement environment and economy in energy accumulation and vulnerable ecology regions:A case of contiguous areas among Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia[J]. Arid Land Geography,2017,40(6):1328－1337.]
[24] 智静,乔琦,傅泽强.干旱地区工业系统资源代谢水平分析——以宁东能源煤化工基地为例[J].干旱区地理,2015,38(1):155－162.[ZHI Jing,QIAO Qi,FU Zeqiang. Resources metabolism analysis for the Ningdong energy(coal)chemical base in Ningxia Province,China[J]. Arid Land Geography,2015,38(1):155－162.]
[25] 唐志强.河西走廊城镇化进程中的资源环境压力定量测评研究[J].干旱区地理,2017,40(4):860－865.[TANG Zhiqiang. Quantitative evaluation on resource-environmental pressure in the urbanization process of the Hexi Corridor[J]. Arid Land Geography,2017,40(4):860－865.]
[26] 彭薇,熊科.环境压力视角的广东省市域生态效率综合评价[J].经济地理,2018,38(8):179－186.[PENG Wei,XIONG Ke. Ecological efficiency evaluation and spatial evolution of Guangdong Province from the perspective of environmental pressure[J]. Economic Geography,2018,38(8):179－186.]
[27] 郭四代,仝梦,郭杰,等.基于三阶段DEA模型的省际真实环境效率测度与影响因素分析[J].中国人口·资源与环境,2018,28(3):106－116.[GUO Sidai,TONG Meng,GUO Jie,et al. Measurement and influencing factors of inter-provincial real environmental efficiency based on three-stage DEA model[J]. China Population,Resources and Environment,2018,28(3):106－116.]
[28] 邢贞成,王济干,张婕.中国区域全要素生态效率及其影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2018,28(7):119－126.[XING Zhencheng,WANG Jigan,ZHANG Jie. Research on regional total-factor ecological efficiency of China: Measurement and determinants[J]. China Population,Resources and Environment,2018,28(7):119－126.]
[29] 罗能生,王玉泽.财政分权、环境规制与区域生态效率——基于动态空间杜宾模型的实证研究[J].中国人口·资源与环境,2017,27(4):110－118.[LUO Nengsheng,WANG Yuze. Fiscal decentralization,environmental regulation and regional eco-efficiency: Based on the dynamic spatial Durbin model[J]. China Population,Resources and Environment,2017,27(4):110－118.]

Temporal and spatial evolution and regional difference analysis of urban ecological efficiency in arid and semiarid areas

ZHAO Ling-di[1,2], LI Sha-sha[1], ZHAO Zhi-bo[1], YU Xiang[3], SUN Ling-xiao[3,4], ZHAO Peng[3,4]

(1 *School of Economics, Ocean University of China, Qingdao* 266100, *Shandong, China*;
2 *Institute of Marine Development of OUC, Key Research Institute of Humanities and Social Science at Universities, Ministry of Education, Qingdao* 266100, *Shandong, China*; 3 *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences. Urumqi* 830011, *Xinjiang, China*; 4 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: In recent years, the arid and semiarid regions in northwest China, including the Xinjiang Uygur Autonomous Region, Inner Mongolia Autonomous Region, Ningxia Hui Autonomous Region, Shaanxi Province, Qinghai Province, and Gansu Province, have undergone rapid development. However, the fragile ecosystems in these areas are facing greater pressure and the conflict between economic development, resources, and the environment is becoming increasingly prominent due to the extensive economic development model that has not yet been fundamentally modified. Eco-efficiency is an effective tool for measuring the degree of coordination of economic, resource, and environmental benefits. In this study, we used the three-stage DEA method to measure eco-efficiency, and thus overcome the effects of external environmental variables and random factors on eco-efficiency to obtain more accurate and reliable eco-efficiency values. Meanwhile, we considered 38 cities in 6 provinces in the arid and semiarid regions of northwest China as research objects and used urban panel data from 2005 to 2016 to analyze the regional eco-efficiency. Therefore, the differences and spatial correlation characteristics of eco-efficiency levels among cities could be depicted and described in a more detailed manner. The results are described as follows: (1) After eliminating the effects of external environmental variables and random factors, the eco-efficiency level of each city changed significantly. The average technical efficiency dropped from 0.65 to 0.57, representing a decrease of 12.3%. The average pure technical efficiency increased from 0.91 to 0.95, showing an increase of 4.4%, and the average scale efficiency decreased from 0.72 to 0.59, indicating a decrease of 18.1%. These results indicate that external environmental variables and random factors have a great effect on eco-efficiency and that it is reasonable and necessary to use the three-stage DEA method to analyze eco-efficiency. (2) In 38 cities, those with medium efficiency and greater accounted for 39% of the total, including 15 cities such as Urumqi, Karamay, and Ordos, while those with low efficiency accounted for 61% of the total, including 23 cities such as Pingliang and Guyuan. These results show that the level of eco-efficiency in the arid and semiarid areas of northwest China is generally low and that there are significant urban differences and imbalances. (3) The global Moran's *I* index was positive and increased yearly, thus indicating that the spatial distribution of eco-efficiency exhibits increasingly significant positive autocorrelations. The local *Getis-Ord Gi** results show that the distribution areas of cold spots and hot spots of eco-efficiency were mostly the same as those of low efficiency, medium efficiency, and above. These results indicate that urban eco-efficiency has an external driving effect and cities with prominent geographical advantages and perfect ecological management levels have high eco-efficiency, which can also promote the improvement of eco-efficiency of neighboring cities and vice versa. This study compensates for the relative shortage of studies of eco-efficiency for cities in the arid and semiarid regions of northwest China. The accurate measurements of the value of eco-efficiency and detailed analyses of the differences and the spatial correlation characteristics of eco-efficiency of the cities in this region enhance the objective understanding of eco-efficiency in the arid and semiarid regions of northwest China, and thus provide new empirical evidence for general improvement in regional eco-efficiency.

Key words: arid and semiarid regions in northwest China; ecological efficiency; three-stage DEA; exploratory spatial data analysis